**DOI**：10.13245/j.hust.250470

# 基于CFD的前置预旋导轮参数敏感性分析

贺 伟[1,2] 唐 鸿[1,2] 张繁锦[1,2] 李子如[1,2]
(1．武汉理工大学高性能船舶技术教育部重点实验室，湖北 武汉 430063；
2．武汉理工大学船海与能源动力工程学院，湖北 武汉 430063)

**摘要** 为系统研究前置预旋导轮(PSV)关键几何参数对其节能效果与阻力性能的敏感性，基于CAESES软件及计算流体力学软件搭建了PSV“设计-仿真-优化”一体化自动仿真流程．首先在CAESES软件中构建包含14个几何特征参数的PSV全参数化模型；随后采用Sobol算法在设计空间内生成系列样本点，借助CFD数值模拟量化各几何参数对桨盘面切向平均预旋转速($\Delta n$)及船舶总阻力($F_T$)的影响；最后应用皮尔逊相关系数$r$进行敏感性分析．结果表明：1～4号定子攻角$\alpha_1$～$\alpha_4$与$\Delta n$均呈显著正相关($r$>0.3)，说明定子负攻角对增强预旋效果更为显著；导管出口直径$R_{out}$与$F_T$呈极强的正相关($r$=0.877)，$R_{out}$增加导致$F_T$显著增加；导管攻角$\alpha_0$、导管长度$L$、5号定子攻角$\alpha_5$与$F_T$相关系数绝对值均在0.2～0.3之间；导轮轴向安装位置及定子的安装角位置对$\Delta n$及$F_T$的影响均相对较小．

**关键词** 前置预旋导轮；参数化建模；计算流体力学；Sobol算法；参数敏感性分析
**中图分类号** U674.131 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0089-07

# Sensitivity analysis of pre-swirl vanes parameters based on CFD

*HE Wei*[1,2] *TANG Hong*[1,2] *ZHANG Fanjin*[1,2] *LI Ziru*[1,2]
(1．Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China；2．School of Naval Architecture，Ocean and Energy Power Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China)

**Abstract** To systematically investigate the sensitivities of the key geometric parameters of the pre-swirl vane (PSV) to its energy-saving efficiency and resistance performance，an integrated automatic simulation workflow of "design-simulation-optimization" for PSV was established based on CAESES and CFD software．First，a fully parameterized PSV model incorporating 14 geometric characteristic parameters was constructed in CAESES software．Then，a series of sample points within the design space were generated via the Sobol algorithm，and the influences of each geometric parameter on the circumferentially averaged pre-swirl rotational speed at the propeller disk ($\Delta n$) and the total ship resistance ($F_T$) were quantified by means of CFD numerical simulations．Finally，the Pearson correlation coefficient was adopted to conduct the sensitivity analysis．Results show that the stator attack angles $\alpha_1$~$\alpha_4$ of stator 1~4 exhibit significant positive correlations with $\Delta n$ ($r$>0.3)，which suggests that the negative angles of attack of the stators have a more pronounced effect on enhancing the pre-swirl effect．The outlet diameter $R_{out}$ of the duct shows an extremely strong positive correlation with $F_T$ ($r$=0.877)，where an increase in $R_{out}$ leads to a significant increase in $F_T$．The absolute values of the correlation coefficients between the attack angle of the duct $\alpha_0$，the length of the duct $L$，the attack angle of stator 5 $\alpha_5$ and $F_T$ all range from 0.2 to 0.3．The axial installation position of the guide vane and the installation angle position of the stator have relatively small impacts on both $\Delta n$ and $F_T$.

**Key words** pre-swirl vanes；parameterized modelling；computational fluid dynamics；Sobol algorithm；parameter sensitivity analysis

**收稿日期** 2025-09-29．
**作者简介** 贺 伟(1982—)，男，副教授；李子如(通信作者)，女，副教授，E-mail：lisay333@163.com．
**基金项目** 国家自然科学基金重点国际合作研究资助项目(51720105011)．

前置预旋导轮(PSV)结合了前置整流导管与预旋定子的优点，能够增大桨叶相对水流的转速，降低尾流的旋转能量损失，提高推进效率，其节能效果优于单个节能装置[1].

PSV的节能效果与其几何形状密切相关，目前国内外学者多采用CFD方法，针对其导管半径、轴向安装位置、定子攻角等参数开展研究，揭示了单一参数变化与螺旋桨水动力性能影响规律及节能效果最优时对应取值[2-6]. 孙涛[7]对前置预旋导轮长度和定子数量进行研究，表明长度减小时，阻力降低，但预旋作用会减弱，节能效果随着预旋定子的减少而减弱. 郭峰山等[1]分别研究导管和定子的节能效果，得出其主要与预旋定子产生的预旋作用有关. Rezaei[8]通过CFD方法探究不对称和对称导轮的节能效果，发现后者节能效果更优. 朱斌等[9]在实船中综合应用PSV等多种节能装置，实现约15%的节能效果；Nadery等[10]则比较了四种前置节能装置的水动力性能差异.

在节能装置优化方面，基于仿真的设计优化方法应用较为广泛. 刘源[11]、鲁宏雪等[12]将参数化建模与CFD相结合，优化了前置整流导管几何外形. Nguyen等[13]将CFD与代理模型相结合，提出了快速预测导管性能的优化框架. 定子优化方面，韩聪[14]基于升力面环量理论提出了定子相对螺旋桨环量的最优比值范围，为定子的优化设计提供理论依据. Furcas等[15]采用BEM-RANSE耦合设计方法，利用遗传算法对前置预旋定子几何形状进行了优化设计. Kang等[16]运用势流分析程序对导轮内部定子进行设计，对导管弦长和定子直径、定子数量及攻角等参数进行研究. Liu等[17]提出了一种基于代理模型的螺旋桨前PSV优化方法.

尽管整流导管等装置的多参数协同优化研究已较为成熟，然而针对前置预旋导轮的研究仍多聚焦于单一参数，其多参数协同优化与敏感性分析研究仍有待深入. 基于此，本研究以某集装箱船为研究对象，基于CAESES软件对其桨前前置预旋导轮进行全参数化建模，结合CFD软件建立了“设计-仿真-优化”自动化仿真流程，应用Sobol算法及皮尔逊相关系数量化揭示了PSV水动力性能($\Delta n$，$F_T$)与14个关键几何参数的敏感性关系.

# 1　敏感性分析流程及参数化建模

## 1.1　敏感性分析流程

敏感性分析主要包括自动化仿真平台搭建和设计变量敏感性量化分析两个环节. 自动化仿真平台搭建基于CAESES构建了PSV全参数化模型，通过软件耦合接口链接STAR-CCM+求解器，在STAR-CCM+中录制计算域、网格划分、边界条件设置等步骤相关宏文件，将宏文件集成至CAESES平台，通过批处理脚本自动驱动仿真流程. 采用Sobol随机序列生成设计参数组合，自动更新导轮几何并输出平均预旋转速$\Delta n$及船舶总阻力$F_T$结果. 导轮水动力性能与其关键几何参数敏感性量化环节则通过对仿真样本结果进行统计分析加以确定. 敏感性分析流程图如图1所示.

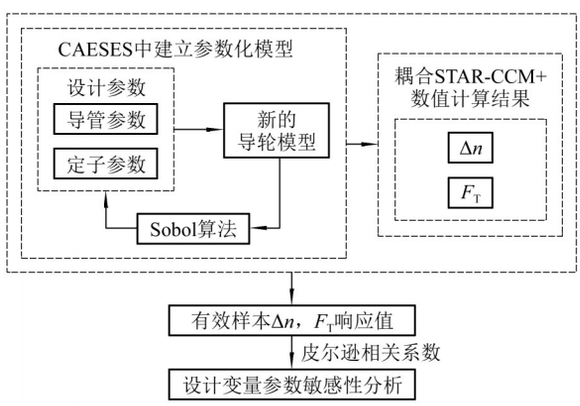



图1　敏感性分析流程图

## 1.2　参数化建模

本研究采用CAESES参数化建模系统完成前置预旋导轮的全参数化建模. 前置预旋导轮由外部导管和内部定子组成，因此须要分别对两部分结构进行参数化表达，同时还要解决两个部件之间的约束，有效选择控制参数.

参数化建模以某带有5叶定子的导轮模型为基础展开(见图2). 该几何参数化表达中遴选了14个关键几何参数并作为后续设计变量，分别为：导管出口到螺旋桨盘面的轴向间距$P_x$；导管出口半径$R_{out}$；导管长度$L$；导管攻角$\alpha_0$；1～5号定子攻角$\alpha_1$～$\alpha_5$；1～5号定子安装角$\theta_1$～$\theta_5$.

各参数定义如图3所示：其中定子攻角顺时针方向旋转为负，逆时针方向旋转为正；安装角以

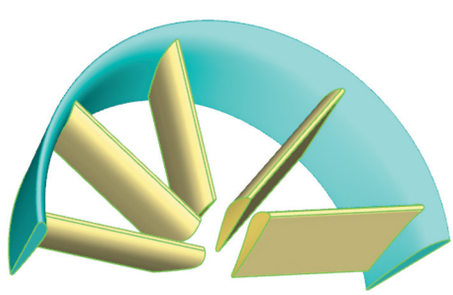
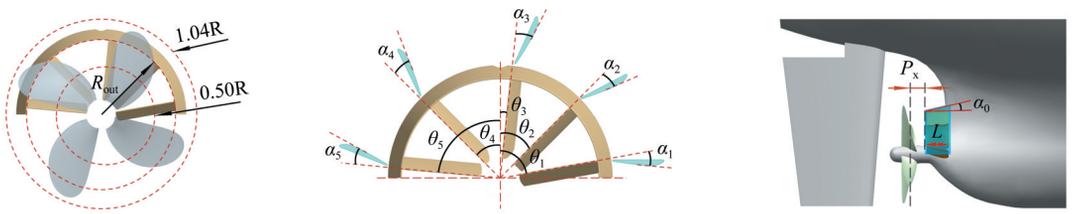


图2　前置预旋导轮原型几何示意图




(a) 导管出口直径　　(b) 定子攻角及安装角　　(c) 轴向安装位置及导管长度

图3　前置预旋导轮各几何参数定义

12点钟方向为0°，顺时针方向为正，逆时针方向为负；定子弦长设为$L$−7 mm．其他未提及几何参数在研究中始终保持与原型一致．

在PSV参数化建模的基础上，采用CAESES软件内置的Sobol算法生成伪随机样本序列．为确保样本序列的有效性，指定各几何参数变化空间如表1所示，表中$R$为螺旋桨半径．

**表1　前置预旋导轮相关设计变量及设计空间**

| 序号 | 设计变量 | 原始值 | 上限 | 下限 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $R_{out}$ | 0.84$R$ | 1.04$R$ | 0.50$R$ |
| 2 | $P_x$ | 0.50$R$ | 0.60$R$ | 0.36$R$ |
| 3 | $L$ | 0.32$R$ | 0.48$R$ | 0.26$R$ |
| 4 | $\alpha_0$/(°) | 7 | 12 | 5 |
| 5 | $\alpha_1$/(°) | −17 | 10 | −20 |
| 6 | $\theta_1$/(°) | 80 | 80 | 50 |
| 7 | $\alpha_2$/(°) | −8 | 10 | −20 |
| 8 | $\theta_2$/(°) | 48.5 | 50.0 | 20.0 |
| 9 | $\alpha_3$/(°) | −15 | 20 | −20 |
| 10 | $\theta_3$/(°) | 6 | 20 | −20 |
| 11 | $\alpha_4$/(°) | −15 | 20 | −20 |
| 12 | $\theta_4$/(°) | −45 | −20 | −50 |
| 13 | $\alpha_5$/(°) | −13 | 10 | −20 |
| 14 | $\theta_5$/(°) | −80 | −50 | −80 |

## 2　CFD数值模型及其有效性验证

### 2.1　控制方程、数值模型及参数设置

采用RANS方法求解非定常不可压缩流体流动，其连续性方程和动量守恒方程为

$$\partial u_i/\partial x_i = 0;$$

$$\rho(\partial u_i/\partial t + u_j \partial u_i/\partial x_j) = -\partial p/\partial x_i + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}),$$

式中：$\rho$为流体密度；$u_i$为平均速度分量($i$=1，2，3)；$t$为流动时间；$p$为平均压力；$\mu$为黏性系数；$-\rho\overline{u_i' u_j'}$为雷诺应力项；$x_i$和$x_j$分别为$i$方向和$j$方向的空间位置矢量的分量．

本研究以在武汉理工大学拖曳水池中开展了模型试验的某集装箱船为研究对象，进行前置预旋导轮的多参数协同作用分析．该船主尺度参数见表2，附体为单舵．

**表2　船模主尺度参数**

| 项目 | 符号 | 模型尺度 | 实际尺度 |
|---|---|---|---|
| 水线长 | $L_{WL}$/m | 5.954 2 | 163.74 |
| 垂线间长 | $L_{pp}$/m | 5.689 5 | 156.46 |
| 水线宽 | $B$/m | 0.990 9 | 27.25 |
| 吃水 | $T$/m | 0.356 4 | 9.80 |
| 湿表面积 | $S_W$/m$^2$ | 8.467 8 | 6 444.60 |
| 排水量 | $\Delta$/t | 1.624 6 | 34 766.00 |
| 缩尺比 | $\lambda$ | 27.500 0 | 27.50 |

基于STAR-CCM+软件对船体绕流场进行数值模拟，计算域尺寸及边界条件设置如图4所示．考虑到自由液面的影响和计算结果的准确性，采用VOF方法捕捉自由液面，选择的湍流模型为SST $k$-$\omega$模型．未加导轮时船体几何及其流场相对于中纵剖面对称，为节省资源，取一半船体进行计算；安装前置预旋导轮后由于几何的不对称性，因此尾部流场也不再与中纵剖面对称，采用全船进行计算．

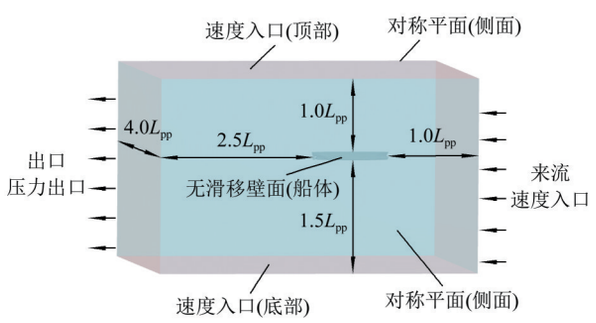



图4　计算域尺寸及边界条件

### 2.2　网格划分及收敛性分析

计算域离散采用切割体网格，船体表面采用棱柱层网格来捕捉边界层流动．为更精确地捕捉流场信息，对自由液面、船体首部、尾部区域进行局部网格加密．图5和图6分别给出了计算域典型剖面的网格及船体表面局部网格加密示意．

为减小网格密度对船舶阻力数值计算的影响，

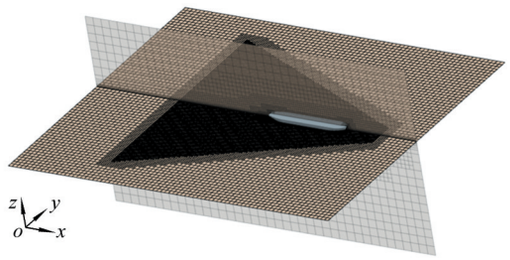



图5　计算域典型剖面网格划分示意图

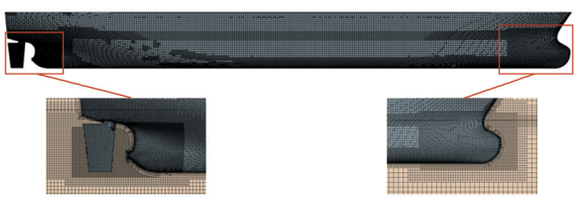


图6　船体表面网格局部加密示意图

参照ITTC推荐的规程7.5—03—01—01进行不确定度分析[18]．基于细化比为$\sqrt{2}$来改变网格的基本尺寸分别得到低、中、高密度三套网格，各方案对应编号为G1，G2，G3，并分别开展数值计算工作．计算针对无导轮船模展开，计算工况取为船模速度$V_m$=1.177 2 m/s，网格参数及对应数值计算结果见表3，表中$\sigma$为计算值与试验值误差．

**表3　网格参数及数值计算结果**

| 方案编号 | 基础尺寸/m | 网格数量/$10^4$ | $F_T$/N | | $\sigma$/% |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 计算值 | 试验值 | |
| G1 | 0.113 | 89 | 10.863 3 | 10.875 1 | −0.11 |
| G2 | 0.080 | 217 | 10.840 8 | 10.875 1 | −0.32 |
| G3 | 0.057 | 506 | 10.833 2 | 10.875 1 | −0.39 |

计算相邻密度两套网格之间阻力计算值之差$\varepsilon$及收敛率$\varphi$

$$\varepsilon_{12}=F_1-F_2;$$
$$\varepsilon_{23}=F_2-F_3;$$
$$\varphi=\varepsilon_{23}/\varepsilon_{12},$$

式中$F_1$，$F_2$，$F_3$分别为低密度、中密度、高密度网格对应的阻力计算值．

当0<$\varphi$<1时，网格单调收敛；当−1<$\varphi$<0时，网格振荡收敛；其余情况则为网格发散．根据上式计算可得$\varphi$=0.337 8，表明阻力计算随网格密度增加呈现出单调收敛趋势．后续当进行阻力数值计算时，为平衡计算精度与效率，统一采用G2网格进行．

## 2.3　计算结果分析与验证

根据确立的数值模型对不同航速下的船模阻力依次开展数值计算．表4分别给出了数值计算结果与模型试验结果的对比，数值模拟与试验测量整体上符合良好，最大误差在6.4%．表4中$Fr$为不同航速下对应的弗劳德数．

**表4　船模阻力计算结果与试验结果比较**

| $V_m$/(m·s$^{-1}$) | $Fr$ | $F_T$/N | | $\sigma$/% |
|---|---|---|---|---|
| | | 试验值 | 计算值 | |
| 0.784 8 | 0.102 7 | 4.797 4 | 5.104 3 | 6.398 |
| 0.882 9 | 0.115 5 | 5.942 1 | 6.300 7 | 6.035 |
| 0.981 0 | 0.128 4 | 7.424 6 | 7.618 7 | 2.614 |
| 1.079 1 | 0.141 2 | 9.112 9 | 9.046 5 | −0.729 |
| 1.177 2 | 0.154 1 | 10.875 1 | 10.840 8 | −0.316 |
| 1.275 3 | 0.166 9 | 13.319 5 | 12.809 4 | −3.830 |
| 1.373 4 | 0.179 7 | 16.040 3 | 15.306 7 | −4.574 |
| 1.471 5 | 0.192 6 | 18.767 4 | 17.804 5 | −5.131 |
| 1.569 6 | 0.205 4 | 21.753 9 | 20.892 4 | −3.960 |

## 2.4　自由液面处理方式的影响

后续参数敏感性分析及进一步的PSV设计优化是否能有效开展取决于试验样本是否足够，意味着这项工作需要巨大的数值计算资源．考虑到自由液面模拟对网格及计算资源的消耗，本研究将采用叠模法对自由液面进行简化以节省计算工作量．仍以工况$V_m$=1.177 2 m/s为例，分别采用叠模及VOF(流体域体积法)两种自由液面处理方法开展了计算，并从船体阻力、桨盘面各向速度及船尾压力分布等方面进行了比较．

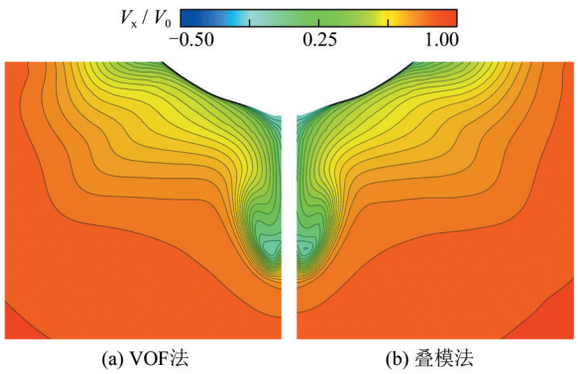
表5给出了不同自由液面处理方式计算结果，表中$\beta$为桨盘面平均轴向伴流分数．从表中可以看出：VOF法与叠模法计算得到的船体阻力及桨盘面处平均伴流分数符合良好，在桨盘面附近流场速度及压力模拟方面，叠模法与VOF法具有基本相当的精度．

**表5　不同自由液面处理方法计算结果比较**

| 方法 | 阻力/N | $\beta$ | 桨盘面平均周向预旋转速/(r·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| VOF法 | 10.840 8 | 0.435 0 | 0 |
| 叠模法 | 10.555 6 | 0.432 8 | 0 |

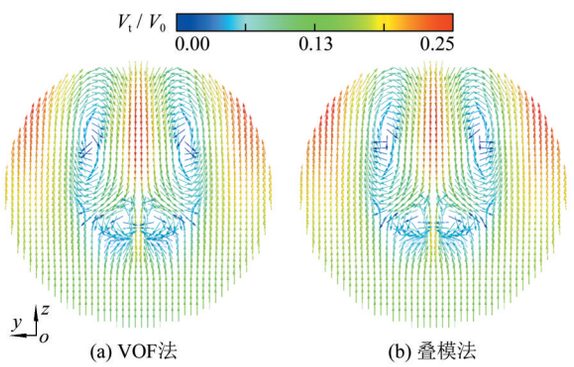
两种自由液面处理方法对应的桨盘面处轴向速度分布、切向速度分布及船尾压力分布分别如图7～9所示，图中：$V_x$为轴向速度分量；$V_0$为来流速度；$V_t$为切向速度分量．

由图7～9可以看出：VOF与叠模法得到的船舶总阻力相差不大，说明兴波阻力的影响不大；VOF法与叠模法得到的桨盘面流动速度分布基本符合；船尾压力分布除在尾部靠近舵叶上部区域有细微差别外，其他区域基本符合，其可能的原因是这部分区域离自由液面相对较近所致．基于上述讨



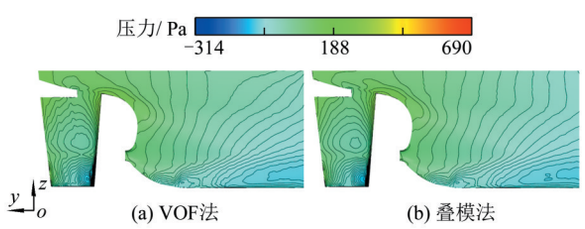

(a) VOF法　　(b) 叠模法

图 7　桨盘面处轴向速度分布对比




(a) VOF法　　(b) 叠模法

图 8　桨盘面处切向速度分布对比




(a) VOF法　　(b) 叠模法

图 9　船尾压力分布对比

论，为节约计算资源在后续试验样本点数值计算时均采用叠模法进行．

## 3　结果与讨论

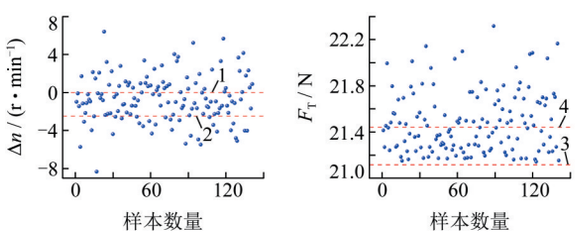
### 3.1　参数敏感性分析

前置预旋导轮通过对流经导轮内部的流体进行预旋使螺旋桨桨叶相对水流的旋转速度增大，有利于提升船舶推进效率，但导轮本身也会产生一定的阻力导致船舶总阻力增加，这两部分综合作用决定了前置预旋导轮的节能效果．本研究将 $F_T$ 及 $\Delta n$ 作为敏感性分析时的量化指标，分析前述遴选的 14 个几何参数对量化指标的敏感度．切向预旋转速计算公式为

$$\Delta n(r,\theta)=\frac{V_T(r,\theta)}{2\pi r},$$

式中：$(r,\ \theta)$为桨盘面上点的极坐标；$V_T$为该点切向速度，切向平均预旋转速则根据盘面各点预旋转速平均而得，从船尾向船首看，以顺时针为正，即与右旋螺旋桨旋转方向一致为正，与螺旋桨旋转方向相反为负．

使用 Sobol 算法在表 1 所述设计空间内进行参数变化生成试验样本，完成导轮的改型．为提高后续参数敏感度分析结果的可靠性，样本总数量设置为 435 个．由于在试验设计中没有对各参数进行关联约束，导致部分方案定子之间出现交叉重合现象，属于不合理样本，扣除之后得到 141 个有效样本．图 10 以散点图形式给出了各样本对应的预旋转速与总阻力计算结果，图中也一并给出了无 PSV 和有 PSV 原型(图 2)对应值．可以看出：预旋导轮总体上产生增阻效应，在预旋效应方面则表现出有正有负，PSV 节能效果的达成的确须要合理选择其几何参数．




(a) 不同样本$\Delta n$分布　　(b) 不同样本$F_T$分布

1—0.00(无PSV)；2— −2.50(PSV原型)；
3—21.12(无PSV)；4—21.44(PSV原型)．

图 10　所有可行设计样本计算结果散点图

获得了试验设计样本的计算结果后，即可对设计变量和量化指标之间的相关性进行分析．使用皮尔逊相关系数 $r$ 进行分析，计算公式参考文献[19]．

一般情况下，$r\in[-1,\ 1]$，1 为完全正相关，−1 为完全负相关，0 为无关．相关系数绝对值越接近 1 表示相关性越强，0.5 到 1 之间表示较强的相关性，0.3 到 0.5 之间表示中等相关性，低于 0.3 表示小相关性．

量化指标($\Delta n$，$F_T$)与 14 个关键几何参数之间的相关系数汇总如图 11 所示，可以看出如下几点．**a**．预旋转速 $\Delta n$ 与导轮定子攻角呈正相关性，1～4 号定子攻角的相关性系数均在 0.3 以上，即负攻角增强预旋的作用更明显，其中 2 号和 4 号定子的影响略高，可能的原因是这 2 个定子分别处于尾鳍斜上方近船底区域，来流速度本身存在较为明显的切向分量所致，其他 10 个参数与 $\Delta n$ 的相关系数绝对值均在 0.2 以内；**b**．总阻力与 $R_{out}$ 呈显著正相关，相关系数达到 0.877，$R_{out}$ 增加将导致 $F_T$ 显著增加；**c**．$\alpha_0$，$L$，$\alpha_5$ 与 $F_T$ 的相关系数绝对值均在 0.2～0.3 之间；**d**．导轮轴向安装位置及定子的安装角位置对 $\Delta n$ 及 $F_T$ 的影响均相对较小．

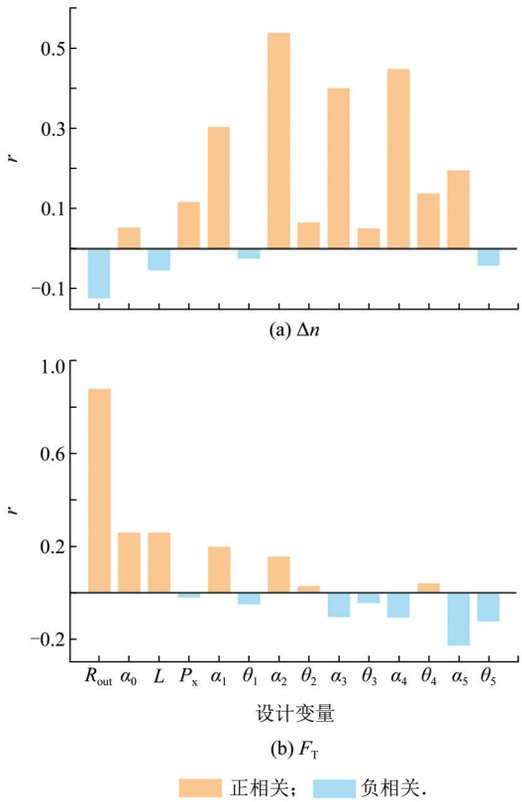



图 11　几何参数与量化指标之间的皮尔逊相关系数汇总

图 12 和 13 分别给出了部分相关性较强的几何参数与量化指标散点分布图，图中直线是根据散点图分布采用线性拟合方法所得，可以看出以下两点．**a**．4 个定子攻角与预旋转速均呈现正相关关系，要产生较大的预旋转速，须将 1～4 号定子的攻角设置为较大的负攻角；**b**．总阻力与导管出口直径、导管攻角、导管长度均呈正相关，与 5 号定子攻角呈负相关，从图 13 中可以看出当导管出口直径越小产生的阻力也越小．

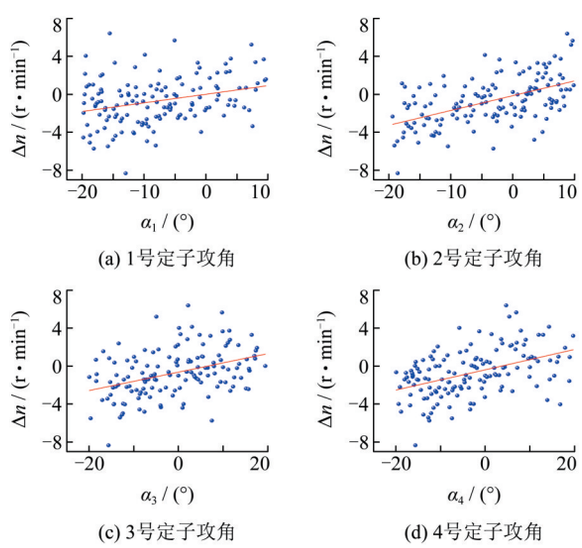



图 12　部分几何参数与预旋转速散点分布

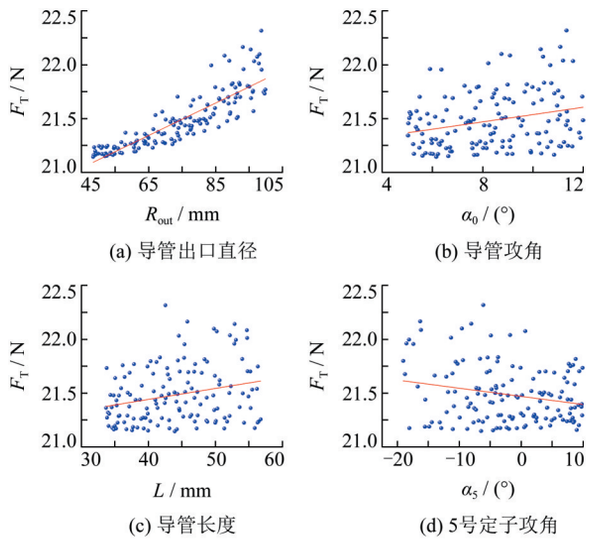



图 13　部分几何参数与船舶总阻力散点分布

### 3.2　典型方案导轮水动力性能分析

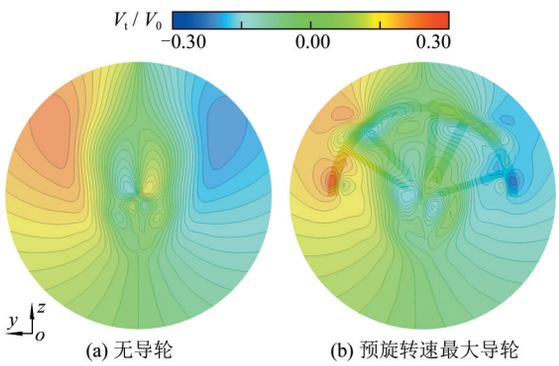
表 6 给出四种典型导轮设计参数值与采用 Sobol 寻优算法后计算得到总阻力及预旋转速的结果对比，从表中可以看出：无法同时满足总阻力最小和预旋转速最大的条件，当总阻力最小时，导轮几乎没有预旋作用，只有增阻效应，当预旋转速最大时，与无导轮相比总阻力仅增加 2.76%，而反向预旋转速达到 8.328 r/min．

**表 6　四种典型导轮设计参数取值及结果对比**

| 参数 | 无 PSV | 原始 PSV | $F_T$ 最小 | $\Delta n$ 最大 |
|---|---|---|---|---|
| $R_{out}/R$ | — | 0.84 | 0.51 | 0.95 |
| $P_x/R$ | — | 0.50 | 0.41 | 0.42 |
| $L/R$ | — | 0.32 | 0.46 | 0.48 |
| $\alpha_0$/(°) | — | 7.00 | 6.16 | 8.39 |
| $\alpha_1$/(°) | — | −17.00 | −0.96 | −12.97 |
| $\theta_1$/(°) | — | 80.00 | 67.17 | 72.03 |
| $\alpha_2$/(°) | — | −8.00 | −4.94 | −18.59 |
| $\theta_2$/(°) | — | 48.50 | 24.51 | 26.09 |
| $\alpha_3$/(°) | — | −15.00 | 11.17 | −15.63 |
| $\theta_3$/(°) | — | 6.00 | 8.98 | 5.63 |
| $\alpha_4$/(°) | — | −15.00 | −12.58 | −15.63 |
| $\theta_4$/(°) | — | −45.00 | −45.02 | −42.97 |
| $\alpha_5$/(°) | — | −13.00 | −6.46 | 2.97 |
| $\theta_5$/(°) | — | −80.00 | −66.58 | −57.03 |
| $F_T$/N | 21.111 2 | 21.441 4 | 21.144 3 | 21.694 9 |
| $\Delta n$/(r·min$^{-1}$) | 0.000 | −2.496 | −0.336 | −8.328 |

图 14 给出了无导轮和预旋转速最大导轮方案对应桨盘面切向速度对比云图，图中：红色代表周向速度方向与螺旋桨旋转方向(右旋)相同；蓝色代表与螺旋桨旋转方向相反．从图中可以看出：与无

导轮相比，预旋转速最大PSV方案导轮内部与螺旋桨旋转方向相反的区域增大，部分红色区域变浅，尤其是1号与4号定子后方预旋程度较强，平均程度上，螺旋桨桨叶相对水流的转速有明显的增大．同时也应该指出，该方案对应的阻力也较无PSV状态有一定的增加，最终该方案是否节能还有赖于后续自航性能的计算与综合评估．




(a) 无导轮　　(b) 预旋转速最大导轮

图14　不同PSV方案桨盘面切向速度分布比较

## 4　结论

**a**．利用CAESES软件完成前置预旋导轮参数化建模，结合CFD软件建立“设计-仿真-优化”自动化仿真流程，并成功应用于后续敏感性分析；

**b**．预旋转速受导轮定子攻角影响最为显著．1～4号定子攻角与预旋转速的相关性最强($r$>0.3)，定子负攻角设置能显著增强预旋效果；

**c**．总阻力对导管出口直径最为敏感($r$=0.877)，表现为导管出口直径增加导致总阻力显著增加；

**d**．导管攻角、导管长度、5号定子攻角对总阻力有中等程度影响(|$r$|在0.2～0.3之间)，导轮轴向安装位置及定子的安装角位置对预旋转速及总阻力的影响均相对较小．

## 参　考　文　献

[1] 郭峰山，苟英迪，李鹏程，等．前置预旋导轮各部分对其性能的影响研究[J]．舰船科学技术，2020，42(3)：63-66，96．

[2] CHANG X，SUN S，ZHI Y C，et al．Investigation of the effects of a fan-shaped Mewis duct before a propeller on propulsion performance[J]．Journal of Marine Science and Technology，2019，24(1)：46-59．

[3] 支玉昌．船舶扇形导管的水动力性能数值预报分析[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2017．

[4] 姜瀚东．新型船舶桨前节能导管的水动力性能研究[D]．镇江：江苏科技大学，2020．

[5] 杨森林．某型散货船尾部节能整流装置设计[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023．

[6] 张阳光．带有前置预旋导轮的船桨水动力性能研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2024．

[7] 孙涛．两种典型船舶节能装置的节能参数研究[D]．上海：上海交通大学，2017．

[8] REZAEI S，BAMDADINEJAD M，GHASSEMI H．Numerical simulations of the hydrodynamic performance of the propeller with wake equalizing duct behind the ship[J]．International Journal of Science and Technology，2022，29(5)：2332-2348．

[9] 朱斌，杨君，黄树权，等．船舶水动力节能装置应用研究[J]．舰船科学技术，2021，43(23)：140-144．

[10] NADERY A，GHASSEMI H，NOWRUZI H．Enhancement of the ship propeller hydrodynamic performance by different energy-saving devices mounted at the upstream zone[J]．Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering，2021，43(10)：469．

[11] 刘源．前置整流导管参数敏感性和节能效果尺度效应研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023．

[12] 鲁宏雪，李楷，董立佳，等．基于响应面法的船舶节能导管优化设计[J]．大连理工大学学报，2024，64(5)：516-525．

[13] NGUYEN V T，CHANDAR D．Ship specific optimization of pre-duct energy saving devices using reduced order models[J]．Applied Ocean Research，2023，131：103449．

[14] 韩聪．基于CFD的船用螺旋桨前置预旋定子优化设计研究[D]．上海：上海交通大学，2018．

[15] FURCAS F，GAGGERO S．Pre-swirl stators design using a coupled BEM-RANSE approach[J]．Ocean Engineering，2021，222：108579．

[16] KANG J G，KIM M C，SHIN Y J．Study on compact pre-swirl duct for slender aft-body crude oil carrier[J]．Journal of Marine Science and Engineering，2022，10(3)：396．

[17] LIU X Y，CHEN J P，SUN W Y，et al．Application of machine learning algorithm in optimization of PSV for 110000Dwt oil tanker[C]// Proc of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering．New York：American Society of Mechanical Engineers，2020：V001T01A003．

[18] ITTC．Uncertainty analysis in CFD verification and validation，methodology and procedures，7.5—03—01—01[R]．Nantes：ITTC，2021．

[19] 陈佳云．基于改进的CMA-ES的仿真足球机器人的行走优化[D]．南京：南京邮电大学，2020．